

药用植物资源遥感监测研究进展

范雨欣¹, 王紫莹¹, 杨颖频², 侯璐², 吴志峰², 王晋年², 王戌梅¹

1. 西安交通大学 药学院, 西安 710061;

2. 广州大学 地理科学与遥感学院/空天遥感创新研究院, 广州 510006

摘要: 药用植物是中医药传承与发展的物质基础, 其体内含有多种生物活性成分, 具有广泛的药理作用。不同地理环境与气候条件下的药材品质差异较大, 目前药用植物在精细化管理、资源的可持续利用、病虫害的动态监控及生长预警等方面存在不足。传统的研究方法存在耗时、费力、破坏性采样等问题, 而遥感技术作为一种无损监测方法, 能够快速、系统地获得大范围、量化、周期性的信息, 目前已广泛应用于中药材的生产过程中。本文结合遥感技术的发展历程及药用植物资源研究现状, 系统综述了遥感技术在药用植物资源调查、质量分析、生长状况监测及胁迫监测等4个方面的应用进展。结果表明遥感技术已经形成了卫星、无人机、地面遥感3类数据互补的感知体系, 同时不断拓展监测维度、加深监测深度、丰富应用场景, 在药用植物研究领域具有广阔的前景。此外, 本文还对目前研究的不足进行了总结, 提出构建多源主动遥感协同感知体系、深入机理探究、推动全周期跨尺度监测、促进多学科交叉融合等方向, 为利用现代科技推动中药材产业持续发展提供新思路。

关键词: 药用植物, 遥感技术, 监测, 资源调查, 质量分析, 环境胁迫

中图分类号: R931.2/P2

引用格式: 范雨欣, 王紫莹, 杨颖频, 侯璐, 吴志峰, 王晋年, 王戌梅. 2026. 药用植物资源遥感监测研究进展. 遥感学报, 30(7): 1982–1996

Fan Y X, Wang Z Y, Yang Y P, Hou L, Wu Z F, Wang J N and Wang X M. 2026. Research progress on remote sensing monitoring of medicinal plant resources. National Remote Sensing Bulletin, 30 (7) : 1982–1996 [DOI: 10.11834/jrs.20265164]

1 引言

中医药是中国传统文化的瑰宝,《中医药振兴发展重大工程实施方案》中指出,传承创新发展中医药是新时代中国特色社会主义事业的重要内容,是中华民族伟大复兴的大事。此外,《中共中央国务院关于促进中医药传承创新发展的意见》、《中药发展战略规划纲要(2016—2030年)》、《“十四五”中医药发展规划》、《中医药标准化行动计划(2024—2026年)》等政策规划也在不同层面上强调了中医药发展的重要性。作为中医药传承与发展的物质基础,药用植物在预防和治疗疾病中发挥着重要的作用。

药用植物种类繁多,植物体内含有多种生物活性成分,如生物碱、黄酮类、萜类、酚类、多糖

类物质等,具有抗氧化、抗肿瘤、抗菌消炎、提高机体免疫力等一系列药理作用(Li等,2023b)。不同地理环境与气候条件下的药材品质差异较大,通常以道地产区的药材为佳。然而,在药用植物的生产和应用过程中,普遍存在着真伪品混杂、品种退化、种植方式混乱等问题。因此,药用植物资源的全链条精准管控,包括药用植物资源精细化调查、生长状况动态监测、药用植物有效成分反演及质量评估,是实现药用植物资源的高效保护与可持续利用的重要保障。传统药用植物资源监测方法,采用人工方式记录物种分布、种群密度及生境特征,定期测量株高、冠幅、叶面积等形态指标,通过实验室仪器分析药品成分理化参量,面临成本高、耗时长、范围有限等一系列问题。药用植物分布范围广、生境复杂,野生药

收稿日期: 2025-05-21; 预印本: 2026-03-19

基金项目: 陕西省中医药管理局中医药科技创新团队项目(编号:TZKN-CXTD-09);国家自然科学基金(编号:42201413);广东省科技计划项目(基础平台类)(编号:2024B1212080004);广州市科技局2025年度基础与应用基础研究专题(青年博士“启航”项目)(编号:SL2024A04J01468)

第一作者简介: 范雨欣,研究方向为药用植物资源。E-mail: yuxin_fan@stu.xjtu.edu.cn

通信作者简介: 王戌梅,研究方向为药用植物资源中药质量评价。E-mail: wangxumei@mail.xjtu.edu.cn

用植物种群存在动态变化(如濒危物种衰退、入侵物种竞争),难以实现大尺度精准监测,无法满足全域资源评估需求,缺乏长期跟踪连续观测和捕捉突发性胁迫事件的能力。此外,人工测量具有很强的主观性,缺乏统一的标准,亟需标准化、智能化的药用植物监测技术。遥感技术作为一种无损监测方法,能够低成本、快速、系统地提供区域甚至全球尺度周期性、量化的作物信息,为药用植物资源监测与管理提供了全新的技术范式。多源遥感(光学/雷达/激光雷达)的协同应用,为药用资源调查、生长状况监测、胁迫状态监测提供数据保障,长时间序列遥感观测为药用植物物候变化及对气候因子的响应研究提供支撑,遥感与人工智能技术深度融合将大幅提升遥感影像的自动解译能力(Liu等,2025)。

2001年以来,中国医学科学院率先利用卫星遥感技术,逐步展开了中药材资源调查的研究(图1),初步建立起一套适用于大面积天然分布或栽培的药用植物监测遥感方法(张本刚等,2005;周应群等,2005;陈士林等,2005)。2007年国内首次提出采用无人机低空遥感为辅助的多级遥感中药资源调查方案,该理念弥补了高空遥感灵活性差、易受云层影响、成本高的不足(谢彩香等,2007)。2012年有学者对中药资源领域中3S技术的应用做出总结与展望,引进高新的3S技术成为领域内热点(孙成忠,2012)。2016年,由中国中医科学院主导的“高分辨率卫星支持下的道地药材栽培信息服务应用示范项目”成功通过验收。该项目开创性地应用高分辨率卫星遥感技术,融合地面调查数据,构建了天地一体化的监测体系,实现了对黄芪、枸杞等特定产区中药材种植分布、产量及环境因子的精准监测。所开发的监测平台在主产区成功示范应用,其核心技术有效支撑了第四次全国中药资源普查(2011年—2022年),标志着中药材遥感监测技术正式从实验室研究迈向规模化应用。

近年来,遥感技术在药用植物研究领域迅速兴起,已经在艾、丹参、白芍、姜、茯苓、金银花、凤丹、黄精等一百余种药用植物的研究中发挥了重要作用(张飞等,2019;杨莓等,2019;张冬梅等,2019;程铭恩等,2021;史婷婷等,2020;尹旻臻等,2019;陈灵丽等,2021)(图2)。本文对近20年来(2005年—2025年)该主题文献

检索统计分析,一共检索到279篇参考文献,20年间相关研究总体呈增多趋势,研究中一半的药用植物入药部位属于根茎类(图3),约占54.51%,研究深度正从表观特征监测向内在精细信息解析深化。例如,该技术正被用于无损提取中药材的化学成分及含量等关键品质信息(图4),为实现中药材质量的高效、无损检测提供了新途径,推动该领域步入定量化发展阶段。主要文献列表见论文的附录,附录内容详细展示了药材名称、所属科名、入药部位、数据源、研究区、应用场景等相关信息。



图1 常见药用植物实拍图片

Fig.1 Photographs of common medicinal plants

为了探索遥感技术在药用植物资源领域的应用路径,本文系统综述了遥感技术在药用植物资源研究中的应用进展,全面阐述了遥感技术在药用植物资源调查与分布制图、有效成分分析与质量评估、生长状况动态监测、以及病虫害与非生物胁迫预警等关键环节的应用现状与发展趋势。重点分析了遥感技术如何突破传统监测方法的局限,为实现药用植物资源的精准化、智能化管理提供创新解决方案。通过典型应用案例,验证遥感技术的实用价值。展望多平台数据融合、机理模型耦合等未来发展方向,为促进中医药现代化和药用植物资源可持续发展提供新的技术范式和研究思路。

2 遥感技术在药用植物资源中的应用

2.1 药用植物资源遥感调查

2.1.1 药用植物分布提取及面积估算

遥感技术能够覆盖大面积区域,可实现快速

获取药用植物资源分布和生物量信息。相比于传统的地面调查，遥感技术可以显著减少人力和时间成本，提升监测效率。对于人工栽培的药用植物，遥感监测有助于摸清种植情况家底，优化种植区域管理策略，对于野生广布种，遥感监测可准确掌握其分布范围和数量，为制定科学的保护和管理策略提供数据支持，防止野生药物资源过度开发和灭绝。准确的药用植物资源数据有助于政府和相关机构制定合理的资源管理政策，促进药用植物产业的健康发展。

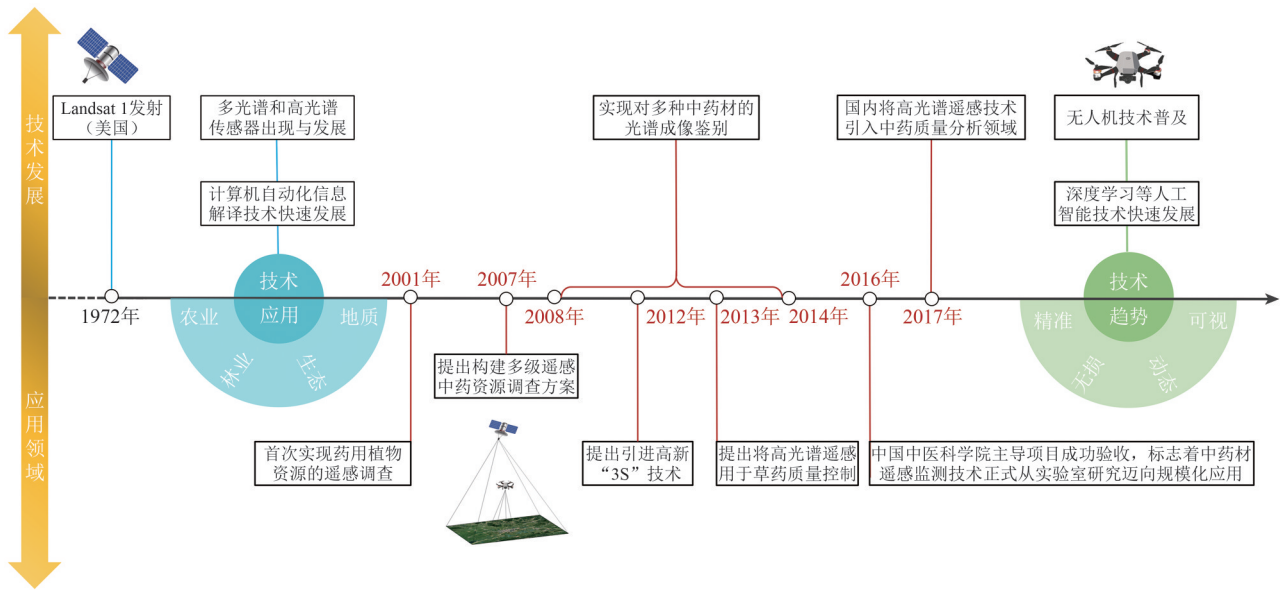


图2 遥感技术在药用植物资源中的应用和发展

Fig.2 Application and development of remote sensing technology in medicinal plant resources

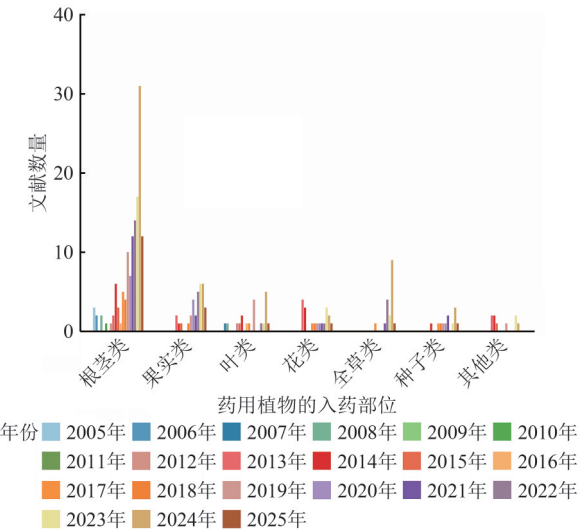


图3 2005年—2025年不同药用植物入药部位的相关遥感监测论文统计(入药部位:根茎类包括根、根茎、块根、根状茎、块茎、鳞茎、茎、茎叶等;叶类包括叶和肉质鳞叶;花类包括花和花序;全草类包括全草和地上部分;其他类包括皮和树脂)

Fig.3 Published papers on remote sensing monitoring for different medicinal parts of medicinal plants from 2005 to 2025

药用植物分布面积估算的数据源多以中、高分分辨率的遥感数据为主(张飞等, 2019; 杨莓等, 2019; 尹旻臻等, 2019)。遥感影像通常需经过辐

射校正、大气校正及几何校正等预处理步骤,以提高数据质量,保障后续特征提取与分类结果的可靠性。为了增加遥感特征维度、提升遥感识别精度,可以对多源遥感数据进行融合。Liu等(2021)利用Sentinel-2的多时相数据和地形特征,在甘肃省临夏回族自治州进行花椒种植面积提取,分类精度高达95.43%。何真等(2022)协同GF-1和GF-6影像通过时间信息捕获艾草关键物候特征,首先基于高分影像GF-1构建20个光谱特征,采用随机森林分类器分析红边指数对艾草识别的贡献度,发现GF-6新增紫波段对区分艾草和其他作物贡献显著(图5(a))。翟富祥等(2023)基于Sentinel-2影像,在新疆库尔勒甘草主产区提出归一化差异多年生植被指数(NDPVI)与归一化差异枯萎指数(NDVWI),以削弱作物和果树干扰,结合决策树方法实现甘草精准识别。已有研究针对同一种药用植物,基于不同遥感数据与技术手段开展识别与监测工作。例如,朱赞等(2020)基于国产16 m分辨率的GF-1开源影像,根据三七的生长环境特点对专家决策树模型进行改进,通过决策树分类法提取三七的荫棚图斑。李宇宸等(2022)

通过 Sentinel-2 卫星遥感影像结合实地调查数据，采用卷积神经网络实现了对云南省文山州的中药资源三七的种植面积实时高精度监测。同时，吴风志等（2021）通过融合 TM/OLI 影像、DEM 等

多源数据的影像光谱特征与空间特征，结合遥感监督分类法与基于阈值（NDVI、海拔与坡度）的决策树分类法，精准提取了云南文山三七种植区的空间分布信息。

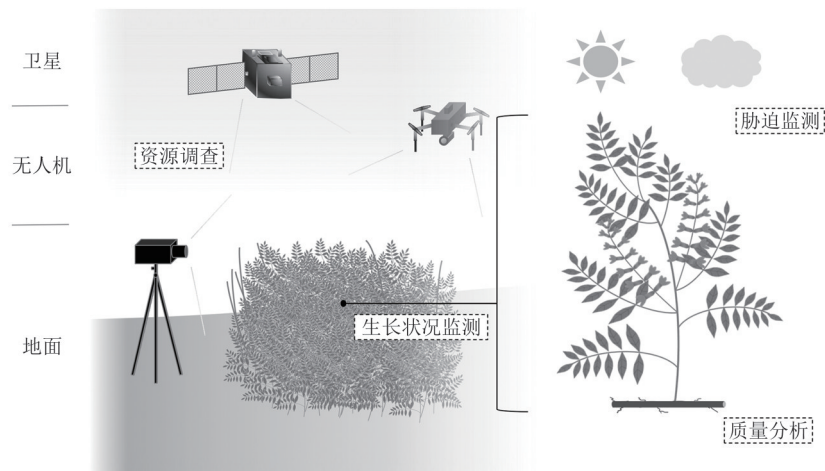


图4 遥感技术在药用植物资源中的应用

Fig.4 Application of remote sensing technology in medicinal plant resources

针对野生稀有药用植物面积与生物量提取，通常采用多级、多源遥感图像融合分析。由于其分布零散、面积较小，需借助高分辨率传感器提升识别精度。关键在于收集地面光谱数据，尽快建立标准光谱数据库，并基于目标物种光谱特征开展对比分析、样本训练、物理模型反演与精度验证等工作。Khderi 和 Yones（2021）利用地面 ASD 光谱仪对埃及西北海岸 27 种重要药用植物进行光谱测量，构建了一个药用植物光谱库，以识别并分析该地区常见药用植物的光谱特征。同时，通过光谱分析提取并计算了 6 种高光谱植被指数，用于评估植被冠层活力。Tshabalala 等（2021）利用手持式光谱辐射计采集了 5 个辣木品种在不同生育期的冠层高光谱反射数据，结合反射率的一阶导数特征和随机森林分类器，不仅实现了品种间的有效区分，还对其生物量进行了估算。

当前药用植物遥感研究多采用中高分辨率数据，结合传统分类方法与深度学习模型，已实现对栽培型药材的高效识别。然而，对于分布于复杂景观、被上层植被遮挡的野生药用植物，传统光学遥感监测仍面临识别难题，亟需引入更具穿透力的数据与方法加以突破。

2.1.2 药用植物空间分布特征研究

种群空间格局是指个体在其生活空间的位置

分布状态和布局特点，是由植物种群生物学特性、种内种间相互作用以及外部环境因子共同作用的结果（唐凤等，2025）。药用植物资源的空间分布格局调查，有利于为药用植物资源有效保护与创新利用提供种质基础及科学依据。通过遥感影像提取药用植物的空间分布信息，可进一步评价药用植物的空间分布特征。卫星遥感为大范围药用植物空间分布特征分析提供了数据支撑，温阿敏等（2015）使用 GF-1WV 影像，结合地面高光谱特征分析，采用监督分类与目视解译相结合的方法，对研究区白喉乌头空间分布进行识别，发现其空间分布总体上呈“带状”分布格局；史婷婷等（2019）基于 WorldView-3 数据，根据不同特征变量（光谱特征、主成分特征、植被指数和纹理特征），通过随机森林分类算法对研究区裸花紫珠空间分布进行遥感提取研究，发现细水乡裸花紫珠主要分布在河流和居民区附近。在小区域范围研究中，无人机遥感灵活、轻便、可操作性强，可替代传统的样方调查方式。丁荣（2021）利用无人机遥感实现更大尺度下的独一味种群点分析和识别。

以上研究证实了遥感方法在调查药用植物分布格局的可行性，遥感技术因其快速、大范围、低成本的优势，正成为药用植物资源调查及空间

分布格局监测的有利工具。通过时序遥感数据分析,可以揭示药用植物物候变化规律及其对环境因子的响应机制,为药用植物资源可持续利用、濒危物种保护和人工栽培区划提供科学依据。

2.2 药用植物质量遥感分析

中药材质量直接影响其药效和安全性,通过科学的质量控制手段,可以确保药材的有效成分含量达到标准,从而提高药物的治疗效果。遥感技术,尤其是高光谱遥感可提供数百个连续的光谱波段,检测到极其微小的光谱差异,根据中药材不同成分在不同波长下精细的光谱吸收和反射特征,可以反演中药材的化学成分。例如,某些特征波段(如红边区、近红外区等)与植物中某些化学成分(如多酚类、黄酮类、挥发性物质等)具有较强的相关性。在中药材的品质鉴定中,遥感技术可以实现区分不同品种、不同生长阶段或不同产地的中药材,甚至能够区分由于环境、气候等因素对药材品质造成的变化。

遥感技术在中药材真伪鉴别与产地鉴定中发挥了一定的作用。以大宗药材枸杞为例,市场内以次充好的现象频发,建立快速有效的产地鉴别模型备受关注。当前研究在波长范围上普遍覆盖可见—近红外和短波红外波段。研究者通过波段融合或结合纹理等多源数据提升信息完整性(刘玲玲等,2023);预处理阶段常采用多元散射校正(MSC)与降噪方法,并辅以一阶或二阶导数等变换方法增强特征。近年来,ZCA白化(王磊等,2020)、二维相关谱(2D-COS)等方法也被用于提升特征表达能力。特征波段选择方面,常见方法包括竞争性自投影算法(SPA)、竞争性自适应重加权采样法(CARS)与迭代保留信息变量法(IRIV)等,以减少冗余、提取信息量高的关键波段。在建立分类模型中,以PLS-DA、SVM等传统方法为主,复杂场景采用CNN等深度学习模型,如Dong等(2022)建立的2D-COS分析的iVISSA-CNN模型显示出较好的结果,校正集和预测集的准确率分别为100%和96.67%。这些模型为枸杞产地识别提供了一种快速、准确且经济高效的解决方案,有助于枸杞产业质量控制和溯源管理。

此外,质控指标成分含量的检测也是极为重要的一环,利用高光谱遥感挖掘特定化学成分与光谱反射、吸收特征之间的关系,基于机器学习

方法构建定量遥感反演模型,可实现对于中药材特定成分的定量反演。Liu等(2019)采用高光谱成像,设计和开发一种非线性CARS-SPA-LS-SVM模型,成功应用于金银花总酚含量的检测;Huang等(2017)探讨了高光谱成像技术与化学计量学结合建模,采用偏最小二乘回归和最小二乘支持向量机两种校正方法,以及连续投影算法、无信息变量消除算法和竞争自适应加权抽样算法3种波长选择算法,快速预测了桑葚中花青素含量和抗氧化活性,结果精度分别达到了95.9%和99.5%,表明HIS应用于化学成分定量测定具有巨大潜力。其中,已有研究表明红外光谱技术能够用于反演植物体内的化学成分含量,且目前利用红外光谱进行中药材品质监测已有大量研究成果(杜晓伟等,2025;乔璐等,2022;余代鑫等,2022),所积累的大量红外光谱数据可为高光谱成像提供定量分析的高精度信息,提高检测的适用性与效率,并增强药材质量监测反演模型的准确性。

这些探索为遥感技术在中药成分定量检测提供了重要支撑。值得注意的是,该技术在中药鉴别与质量评价领域的应用探索由来已久。2008年—2014年,马骥团队利用光谱成像技术,成功对白鲜皮及其混伪品(如八角枫)等5种皮类中药,以及鹿茸、黄柏饮片等药材进行了快速鉴别与质量评价可行性验证(赵静等,2008,2010;胡翠英等,2014)。2013年,Vermaak课题组提出将高光谱遥感用于草药质量控制,并成功应用于中国八角、紫锥菊、防己等草药的混伪品鉴定(Vermaak等,2013;Sandasi等,2014;Tankeu等,2016)。2017年,Xia等(2017)将该技术引入中药质量控制领域,系统比较了10种不同波长选择方法对不同来源麦冬的鉴别性能。目前,遥感技术在中药质量检测领域仍面临多重挑战。如不同产地的同一种药材在同一波段内的光谱比较接近,样本量不够充足时使得鉴别的误差较大,需依赖数据融合和深度学习模型提升分类精度,但模型易受光照条件、样本含水量等干扰,泛化能力受限。实际应用时则存在标准体系缺失、设备成本高昂、以及产业化落地困难等问题。现有研究多局限于实验室小样本验证,难以满足在线高通量分选需求。此外,药材生长年限、加工工艺等因素进一步增加了质量控制的复杂性。

2.3 药用植物生长状况遥感监测

2.3.1 药用植物株高和体积反演

药用植物的株高和体积与植株的生长状态和趋势密切相关，在植株的生长过程中对其株高与体积进行实时监测有助于及时发现并解决植株所面临的生长问题；在采收期快速获取植株的株高与体积信息能够为不同管理状态下植株的表型及生长状况分析工作提供依据。结合无人机多光谱技术获取多光谱正射影像和数字地表模型，通过支持向量机算法获取油茶冠层区域位置信息，从而提取油茶株高均值，评估效果良好（ $R^2=0.74$ ， $RMSE=3.4$ ），但存在监测结果整体偏高的情况，可能和模型精度和模拟土壤面的打点位置相关（陈龙跃 等，2024）。Njane 等（2023）开发了一个能够精确估计马铃薯性状的自动系统，用于处理架有多光谱相机的无人机所获取的图像数据。在 15 m 的飞行高度下，无人机测量所获得的株高数据与实际高度间存在 $R^2=0.803$ 的强线性相关性，体积数据间存在 $R^2=0.839$ 的线性相关，表明测量精度较高。但随着飞行高度的增加，图像分辨率明显下降，致密点云中的噪声导致对植物高度、体积的提取不准确，对评估的精度存在一定的影响。这表明，较低的飞行高度能够实现对作物高度和体积更精确的反演。模型验证采用独立样本进行交叉验证，结果证实了模型的预测精度和可靠性。目前，应用无人机遥感技术分析药用植物株高和体积，判断植株个体的生长状态，能够较为广泛地应用于精准农业管理，其关键在于构建株高和体积与遥感参量之间的相关性模型。

2.3.2 药用植物叶面积指数反演

叶面积指数指每单位地表面积的叶组织单侧总面积，是反映植被许多生理生化过程的重要指标之一（Watson，1947）。叶面积指数的传统测量方法普遍存在耗时、费力、破坏性采样等缺陷（Kamenova 和 Dimitrov，2021），利用遥感技术能够实现叶面积指数的快速、无损测定。利用无人机搭载多光谱相机能够快速获取水稻冠层的遥感影像，通过简单线性回归分析发现红边叶绿素指数（ $R^2=0.80$ ）、归一化差值红边植被指数（ $R^2=0.78$ ）等植被指数与叶面积指数相关性较高；纹理特征方面，近红外波段的均值等特征与叶面积指数相

关性较好，构建的归一化差值纹理指数与叶面积指数的 R^2 为 0.59（王伟康 等，2023）。进一步采用偏最小二乘回归和人工神经网络融合光谱纹理特征建模，人工神经网络模型表现最佳，其验证 R^2 由 0.75 提升至 0.86， $RMSE$ 显著降低，表明该模型通过非线性映射关系有效减少了由数据采集、模型假设和数据预处理等因素所引起的误差的影响，对水稻叶面积指数反演具有较高精度和可靠性。然而，通过多光谱技术所获取的冗余信息较多，产生的噪声极易对测量结果产生干扰。运用高光谱辐射计测量冬小麦冠层高光谱反射率，提出了一种新的连续加权衰减遗传算法（CRDGA）以更有效地筛选与叶面积指数相关的关键波段，并采用多种机器学习算法作为适应度评估函数，最终发现基于 CRDGA-K 最近邻回归（KNNR）筛选的波段构建的 KNNR 模型在验证集上表现最佳（ $R^2_v=0.7403$ ， $RMSE_v=1.8004$ ）（Yang 等，2025）。CRDGA 通过灵活控制筛选波段数量和分布，减少了冗余信息，降低了过拟合风险，从而提高了模型的泛化能力和估算精度，能够有效实现冬小麦叶面积指数的高光谱估算。此外，由于植株冠层结构分布复杂且不均匀，遥感反演的病态问题难以克服，上述基于经验统计模型的叶面积指数反演方法的适用性在一定程度上受到限制。因此，应当充分考虑药用植物的生长特性和种植环境，对遥感反演过程加以先验知识的约束，是提高模型精度的重要途径。

2.3.3 药用植物叶绿素含量反演

植物的光谱特性主要由其理化性质决定，运用遥感技术分析药用植物光谱特征的差异能够有效反映其内部物质组成及含量的不同。叶绿素是植株光能吸收和能量转化的重要化学成分，为提高柑橘果树植株叶绿素含量反演精度，肖斌（2023）采用连续小波变换与分数阶导数对原始光谱进行预处理，消除基线漂移及重叠峰干扰，强化光谱特征。在此基础上，通过植被指数构建与波段组合优化筛选敏感波段，结合 Hyperopt 优化的集成学习回归模型进行估测，模型精度进一步提高（ $R^2=0.891$ ），验证了多方法融合在提高反演精度方面的有效性。获取 3 个生长阶段下甘草的高光谱图像，提取特征波段和植被指数，使用不同输入特征构建其叶绿素含量的反演模型（Xu 等，2024）。

在无人机甘草反演模型中, 竞争自适应重加权采样—偏最小二乘回归组合算法在成熟期取得最佳结果 ($R^2=0.83$, $RMSE=1.279$, $MAE=1.215$), 表明特征选择和机器学习算法结合能有效提高模型精度。误差分析结果表明, 特征选择步骤对提高 R^2 和降低 $RMSE$ 至关重要, 模型在测试集上的表现稳定, 具有较好的泛化能力和实用性。此外, 针对植株的不同生长阶段, 应当结合各阶段的特点、分别对其特征波段进行筛选并适当调整预测模型以准确测定其叶绿素含量。

2.3.4 药用植物营养元素含量反演

药用植物的营养状况往往与其生长发育、逆境胁迫耐性、生化反应速率等相关。传统的营养元素含量测定方法通常具有滞后性、破坏性、操作复杂等缺陷, 遥感技术则能够对药用植物的营养元素含量进行快速、无损检测。早期、快速和准确地营养元素含量诊断有助于在作物生产中即时有效地调节营养水平、调整管理方式。在小麦孕穗期记录其叶片和冠层的高光谱反射数据和营养状况, 将短波红外区域的反射率与可见光或近红外区域的反射率结合, 通过回归模型分析能够有效检测氮、磷、硫、钾的含量, 但预测精度有限 (Mahajan 等, 2014)。因此, 仍需探索适用性更广、预测精度更高的算法和模型对植株的营养元素含量进行检测。利用近红外反射光谱结合机器学习和深度学习技术, 能够构建紫苏种子中钙、铜、镁、锰和磷 5 种重要矿物质的反演模型 (Singh 等, 2024)。研究结果表明, 1D 卷积神经网络在预测钙、镁和磷含量时表现最佳 (RPD 值分别为 1.75、1.83 和 2.96), 而支持向量回归在铜和锰预测中表现最优 (RPD 值分别为 1.82 和 2.2)。研究指出, 模型性能的提升主要归因于 1D 卷积神经网络对原始光谱数据的直接处理能力, 能够对复杂的非线性关系进行捕捉; 而支持向量回归在处理低浓度矿物质时表现出色, 这可能与其对异常值的敏感性较低有关。通过配对 t 检验验证了模型预测值与实际值之间无显著差异, 进一步证实了模型的可靠性和实用性。Li 等 (2023a) 基于无人机多光谱传感器对川芎植株营养元素含量进行反演建模, 在变量筛选环节, 运用信息值和皮尔逊相关系数分析剔除了冗余变量; 对 6 种算法进行比对后发现逻辑回归算法展现出最优的分类性

能, 其各时期及飞行高度下对氮、磷、钾缺乏植株与正常植株的识别准确率分别高达 100.0%、92.4%、91.7%。然而, 药用植物营养元素含量反演面临着含量低、光谱响应弱、反演精度受限的问题, 因此, 还需进一步探究不同营养元素的光谱特征响应机理, 分析不同营养元素浓度的叶片或冠层的光谱响应特征, 为提高反演精度提供理论基础。

2.4 药用植物胁迫遥感监测

2.4.1 药用植物温度胁迫监测

非生物胁迫指特定环境下对植物本身产生不利影响的非生物因素, 能够通过改变渗透压、累积活性氧和毒性离子、损伤细胞壁、破坏信号传导途径等导致植物本身受到损害 (Li 等, 2025; 罗玲 等, 2025)。其中, 温度是影响作物生长和产量最关键的环境因素。低温胁迫会导致叶绿素合成受到抑制, 改变细胞结构并减缓植株代谢速率 (Fu 等, 2016; Ortiz 等, 2017); 而长期高温胁迫会导致植株叶片衰老和脱落, 使其光合能力下降、影响代谢变化, 此外还会增加活性氧的累积、对细胞膜产生损伤 (He 等, 2017)。因此, 对药用植物的高低温胁迫进行监测对于提高植株的抗逆性和产量具有重要意义。正常状态下马铃薯样本的反射光谱曲线较为平滑, 而冻伤的样品在 440 nm、560 nm 和 680 nm 附近存在明显的吸收峰, 由此可以判断个体是否遭受低温胁迫 (邹志勇 等, 2019)。高温干旱胁迫下, 通过无人机多光谱遥感获取植被指数, 利用支持向量机构建苧麻抗旱性鉴定模型, 其正确率可达 0.74, 能够有效评估苧麻的耐旱等级 (付虹雨 等, 2023)。利用方差分析锚定 731 nm 和 745 nm 处最高 F 值, 能够有效区分热应激人参, 其准确率可达 96.26% (Faqeerzada 等, 2022)。对不同增温处理下不同生长阶段水稻的冠层高光谱数据及其生长参数进行统计分析, 主要通过植被指数、生物量、氮素含量等指标判断胁迫情况, 建立监测模型, 效果良好 (杨晓瑾, 2020)。不同生育时期的光谱反射率不同, 且温度对光谱的反射特性不产生影响, 因而能够通过遥感技术较为精准地对植株受高低温的胁迫情况进行实时监测, 但也需考虑植株不同生长阶段下光谱反射特征的选择。

2.4.2 药用植物水分胁迫监测

干旱胁迫对植株的生物量、株高等生长表型影响较大,可能会导致植物体内的水分流失、渗透压失衡(He等, 2020; Bai等, 2006);水涝环境下,植株根系的呼吸作用受到抑制,易导致有毒有害物质的累积(Colmer和Greenway, 2011)。因此,对植株生长状况进行实时监测不仅能合理控制种植过程中的水分管理,也能够避免干旱和水涝胁迫对植株生长产生不利影响、从而提高产量。通过高光谱遥感技术能够对药用植物在不同水分条件下的光谱响应进行监测,从而及时发现植株生长过程中所受胁迫的情况,改变田间管理措施进行干预。由于400—700 nm能够观测到干旱所导致的叶片色素光谱变化,通过紫外、近红外光谱能够对月桂叶岩蔷薇、西班牙薰衣草、乳香黄连木的干旱胁迫情况进行监测(Dao等, 2021; El Azizi等, 2022)。干旱胁迫下,冬小麦冠层光谱的红边幅值减小、红边位置蓝移、红边面积减小,由此可以判断出其受干旱胁迫的程度(肖璐洁等, 2020)。通过建立基于叶绿素荧光参数的模型可用于拟合净光合速率、气孔导度、初始荧光、最大光化学效率动态等,模型的决定系数、归一化均方根误差和光谱参数对涝害的敏感性均表现良好,其NRMSE基本在20%以下,由此能够有效监测棉花在水分胁迫下的受涝程度(吴启侠等, 2020)。运用遥感技术对药用植物的干旱胁迫和水涝胁迫进行监测,往往也是通过植株的生长状况、光合指标和光谱特性等进行判断。

2.4.3 药用植物重金属胁迫监测

重金属胁迫会导致植株矮小、抑制根系生长、产量降低,同时增强氧化应激反应、积累有毒有害物质(Wakeel等, 2018; 张玉秀等, 2013)。而药用植物生长对于环境要求严苛,土壤或水体中的重金属污染会直接影响其生长过程及品质形成(吴亚东等, 2014)。通过短时傅里叶变换时频分析技术研究铜胁迫下玉米叶片光谱的能量振幅响应,随铜浓度的增加,玉米叶片的光谱呈现红边“蓝移”现象,由此能够判别玉米受铜胁迫的程度(孟飞等, 2021)。观测锰胁迫下青葙的高光谱变异特征,发现随锰浓度的增加,叶绿素吸收红光和蓝光所形成的深谷逐渐变浅,红、蓝谷之间的绿峰趋于平缓,由斜率的线性减少能够准确

判断植株所受胁迫程度(陈三明等, 2018)。然而,现实情况下植物生长所遭受的重金属胁迫往往不止一种,分析400—1200 nm波段内青葙叶面反射光谱的特征参量,通过回归分析与锰、铜、铬等13种重金属元素及其所提取出的共性因子建立关系模型,拟合效果良好,表明利用光谱特征能够较好地分析出药用植物体内的重金属含量(陈三明等, 2018)。通常而言,重金属胁迫下植物的生理参数与光谱响应间呈现复杂的非线性关系,因而需要通过算法和模型的改进、更新进行支撑。

2.4.4 药用植物病虫害监测

药用植物在生长过程中遭受到的生物胁迫主要为病虫害。病虫害在植物生长的各个阶段都能对植株产生影响,严重时主要导致药用植物产量降低和品质下降。因此,及时对药用植物病虫害发生的原因及范围进行监测,有助于采取有效的防治方式抑制病虫害的蔓延趋势,降低其对植株生长的影响。高光谱遥感技术可捕捉细微的光谱反射特征差异,能够更清晰地识别植物生长和发育过程中的细微变化,有助于人们在药用植物染病或虫害早期采取干预措施(Lowe等, 2017)。以Fisher判别分析法构建检测模型,基于冠层原始光谱提取特征波长、光谱指数、光谱特征参数等,能够实现对毛竹中刚竹毒蛾虫害程度的大面积检测,判别精度可达84.4%,检测效果明显(郑蓓君等, 2021)。将近地遥感光谱成像技术与无人机遥感技术相结合,收集枸杞树冠的光谱反射数据,采用全连接神经网络构建枸杞病虫害遥感监测模型,该模型对枸杞木虱的预测精度达94.86%,对枸杞瘿螨的预测精度达96.82%,为枸杞虫害的快速监测提供了理论基础(Zhao等, 2024)。通过高光谱成像系统在380—960 nm的可见光波段内对刺五加叶片样本的光谱数据进行采集,运用多项式核函数和径向基核函数的支持向量机法分别进行模型构建,均能够较为精准地识别出刺五加黑斑病的早期患病个体(准确度分别为92.77%、92.64%),为药用植物病害的自动诊断提供了新的方法(赵森等, 2021)。然而,在病虫害的监测过程中,不同类型的病虫害对植物产生胁迫时可能表现出相同或相似的光谱特征,即“异物同谱”现象,而相同病虫害类型胁迫同一种作物时,可

能具有不同的光谱特征,即“同物异谱”现象。因此,为精确判断植物所受胁迫的类型及原因,应结合多源遥感、地面物联网、地理环境要素、气象因子等多种数据,同时可配合生物学方法对病原体进行分析、精准判断病因,从而采取有效的防治措施。

3 结论与展望

3.1 结论

药用植物作为具有高经济与医药价值的特殊植被类型,其遥感监测取得了显著进展,在过去二十年间经历了从初期的物种识别向资源普查、质量评价及胁迫监测多维度体系的深刻变革。遥感技术已成为中药材数字化普查与规范化种植不可或缺的科技支撑。当前研究现状和不足总结如下:

(1) 在数据源方面,形成了卫星、无人机、地面遥感3类数据互补的感知体系。卫星遥感(如Sentinel-2、Landsat、ZY-3、GF系列)实现了大尺度道地药材种植分布的宏观摸底;无人机遥感的普及,填补了地块尺度精细监测的空白,可以实现单株植株监测;地面近地光谱探测可以实现对根、茎、叶等入药部位的精细测定。然而,尽管高空间、高光谱分辨率光学影像大幅提升了监测分辨率,但目前应用存在数据源类型单一、多源协同不足等问题,尤其是缺乏合成孔径雷达(SAR)及激光雷达(LiDAR)等主动遥感的应用,难以满足多云雨地区及复杂多层生境(如林下药材)的监测需求。

(2) 监测维度深度拓展,已从单纯的面积提取演进为涵盖资源调查、质量分析、生长及胁迫监测的综合体系。特别是高光谱遥感技术的应用,使得药材品质的非接触式评价成为可能。研究者已成功建立起光谱反射率与叶绿素、水分及部分次生代谢产物(如黄酮、多糖等)之间的关联模型,实现了定量指标的反演。然而,在模型构建方面,现阶段多采用经验统计模型建立光谱特征与指标间的关联,地物“同物异谱、异物同谱”现象导致的病态反演问题依然突出。特别是针对药材质量评价,研究多聚焦于单一成分的反演,缺乏对多种化合物耦合发挥药效的机理阐释,光谱响应特征与药效成分的映射机制仍不够明确。

(3) 应用场景不断丰富,遥感技术已广泛应

用于全国中药资源普查及道地药材适宜性评价中,初步实现了对药用植物生长状况、营养水平及干旱、病虫害等胁迫状态的动态跟踪。然而,针对种子萌发、营养生长、生殖生长至采收期等全生命周期的连续追踪研究相对匮乏,药用植物病虫害及气象灾害的遥感监测多处于灾后评估阶段。由于药用植物生理响应特征的复杂性,缺乏基于热红外、叶绿素荧光等敏感指标的早期预警机制,难以实现灾害发生前的风险干预与精准减损。监测技术标准体系亟待建立,制约了其在精准农业范式下的深度应用。

3.2 展望

针对当前研究的不足,未来药用植物遥感监测需聚焦以下核心方向,推动技术从理论探索走向深度应用:

(1) 构建空天地一体化的多源主动遥感协同感知体系。针对野生及林下药用资源极高的地表空间异质性,应加强主/被动遥感的深度融合。利用SAR卫星的全天候成像能力突破多云雨天气限制,协同LiDAR激光束的缝隙穿透性与多回波技术,获取高精度三维点云数据。通过剥离乔木冠层干扰,实现乔、灌、草多层混合生境下药用资源的精细识别与生境解析,形成多平台、多波段的优势互补感知网。

(2) 深入机理驱动的药材质量定量反演与评价。未来研究应由“经验回归”转向“机理驱动”,深入探究药用植物次生代谢产物(如皂苷、生物碱等)与高光谱特征的响应机制。通过引入先验知识约束,构建耦合植物生理生化参数的物理模型,缓解病态反演难题。针对难以直接探测的成分,应重点探索其与叶绿素、水分、荧光等光谱敏感参数的内在关联,实现基于遥感的药材品质全方位、非接触式客观评价。

(3) 推动全生命周期精准监测与跨尺度预警应用。聚焦具体落地场景,针对高山濒危药材(如冬虫夏草)构建“天地一体”监护网络实现种群衰退预警;针对大宗道地药材(如当归、黄芪)建立多级反演模型进行真伪鉴别与质控;利用长序列遥感数据驱动适生区迁移模型,指导气候变化下的栽培布局。同时,通过热红外与雷达协同监测,构建根腐病等病虫害的早期识别模型,实现精准干预。

(4) 促进多组学整合与人工智能深度融合。跨学科融合是未来的必然趋势, 应将遥感获取的表型数据与基因组、代谢组、转录组等组学技术相结合, 在不同发育阶段量化分析遗传规律。同时, 巧妙运用深度学习与基础大模型提升海量异构数据的解析效率, 实现对药用植物性状的智能预测, 从而加速药用植物育种栽培的数字化与智能化进程。

参考文献(References)

- Bai L P, Sui F G, Ge T D, Sun Z H, Lu Y Y and Zhou G S. 2006. Effect of soil drought stress on leaf water status, membrane permeability and enzymatic antioxidant system of maize. *Pedosphere*, 16(3): 326-332 [DOI: 10.1016/S1002-0160(06)60059-3]
- Chen L L, Shi T T, Yin M Z, Yang M, Peng H S, Cheng M E, Li L and Zhang X B. 2021. Contrastive analysis of extraction of *Polygonatum cyrtonema* planting area based on data of "Resource 3". *China Journal of Chinese Materia Medica*, 46(2): 267-271 (陈灵丽, 史婷婷, 尹旻臻, 杨莓, 彭华胜, 程铭恩, 李雷, 张小波. 2021. 基于资源三号数据的多花黄精大田种植区域提取方法比较. *中国中药杂志*, 46(2): 267-271) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20201026.102]
- Chen L Y, Duan D D, Zhang Z M, Sun H, Gao J H, Jiang Y and Ran C. 2024. Using UAV multi-spectral imaging to monitor the carbon storage of *Camellia oleifera*. *Agriculture and Technology*, 44(24): 28-32 (陈龙跃, 段丹丹, 张祖铭, 孙鹤, 高佳华, 姜毅, 冉成. 2024. 利用无人机多光谱成像监测油茶碳储量. *农业与技术*, 44(24): 28-32) [DOI: 10.19754/j.nyyjs.20241230007]
- Chen S L, Zhang B G, Zhang J S, Zhou Y Q, Su G Q, Xiao S Y, Yang Z and Xiao P G. 2005. Study of method for application of remote-sensing technology to investigation of reserves of ginseng resources. *World Science and Technology/Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica*, 7(4): 37-43, 36, 86 (陈士林, 张本刚, 张金胜, 周应群, 苏钢强, 肖诗鹰, 杨智, 肖培根. 2005. 人参资源储藏量调查中的遥感技术方法研究. *世界科学技术—中医药现代化*, 7(4): 37-43, 36, 86) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-3849.2005.04.008]
- Chen S M, Tu Y, Zhao Y L, Liu Z Y, Xu J S, Wei L and Shao R Z. 2018. Relational model between the hyperspectral variability of *Celosia argentea* L. growing in manganese stress environment and the content of metal elements in the canopy. *Journal of Guilin University of Technology*, 38(4): 744-751 (陈三明, 涂媛, 赵袁磊, 刘智颖, 徐嘉盛, 韦龙, 邵润泽. 2018. 锰胁迫青葙的高光谱变异特征与叶冠金属元素含量的关系模型. *桂林理工大学学报*, 38(4): 744-751)
- Cheng M E, Yang M, Yin M Z, Jing Z X, Peng H S, Shi T T, Du F P and Zhang X B. 2021. Suitable planting area of *Poria cocos* in Jinzhai county of Dabie Mountains region. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 46(2): 260-266 (程铭恩, 杨莓, 尹旻臻, 景志贤, 彭华胜, 史婷婷, 杜方平, 张小波. 2021. 大别山区金寨县茯苓适宜种植区研究. *中国中药杂志*, 46(2): 260-266) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20201024.102]
- Colmer T D and Greenway H. 2011. Ion transport in seminal and adventitious roots of cereals during O₂ deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62(1): 39-57.
- Dao P D, He Y H and Proctor C. 2021. Plant drought impact detection using ultra-high spatial resolution hyperspectral images and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102: 102364 [DOI: 10.1016/J.JAG.2021.102364]
- Ding R. 2021. Artificial Intelligence Identification and Population Spatial Distribution of *Lamiophlomis Rotata* in UAV Remote Sensing Images. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine (丁荣. 2021. 无人机遥感影像中独一味人工智能识别及种群空间分布格局研究. 成都: 成都中医药大学) [DOI: 10.26988/d.cnki.gcdzu.2021.000704]
- Dong F J, Hao J, Luo R M, Zhang Z F, Wang S L, Wu K N and Liu M Q. 2022. Identification of the proximate geographical origin of wolfberries by two-dimensional correlation spectroscopy combined with deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198: 107027 [DOI: 10.1016/j.compag.2022.107027]
- Du X W, Song P S and Ni L. 2025. Research on rapid identification method of origin of Dangshen (*Codonopsis pilosula*) based on Fourier transform infrared spectroscopy technology. *Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 43(3): 75-78 (杜晓伟, 宋平顺, 倪琳. 2025. 基于傅里叶变换红外光谱技术对中药党参产地快速判别方法的研究. *中华中医药学刊*, 43(3): 75-78) [DOI: 10.13193/j.issn.1673-7717.2025.03.012]
- El Azizi S, Amharref M and Bernoussi A S. 2022. Study of drought effects on three medicinal and aromatic plants using field spectroscopy. *Journal of Ecological Engineering*, 23(12): 155-162 [DOI: 10.12911/22998993/154599]
- Faqeerzada M A, Park E, Kim T, Kim M S, Baek I, Joshi R, Kim J and Cho B K. 2022. Fluorescence hyperspectral imaging for early diagnosis of heat-stressed ginseng plants. *Applied Sciences*, 13(1): 31 [DOI: 10.3390/AP13010031]
- Fu H Y, Wang W, Lu J N, Yue Y K, Cui G X and She W. 2023. Screening of drought-tolerant ramie based on UAV multispectral imagery. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 54(4): 206-213 (付虹雨, 王薇, 卢建宁, 岳云开, 崔国贤, 余玮. 2023. 基于无人机多光谱的耐旱苧麻品种筛选方法. *农业机械学报*, 54(4): 206-213) [DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2023.04.020]
- Fu J J, Gates R N, Xu Y F and Hu T M. 2016. Diffusion limitations and metabolic factors associated with inhibition and recovery of photosynthesis following cold stress in *Elymus nutans* Griseb. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 163: 30-39 [DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2016.08.008]
- He B, Guo T, Huang H, Xi W and Chen X. 2017. Physiological responses of *Scaevola aemula* seedlings under high temperature stress. *South African Journal of Botany*, 112: 203-209 [DOI: 10.1016/j.sajb.2017.05.032]
- He X S, Xu L C, Pan C, Gong C, Wang Y J, Liu X L and Yu Y C.

2020. Drought resistance of *Camellia oleifera* under drought stress: changes in physiology and growth characteristics. *PLoS One*, 15(7): e0235795 [DOI: 10.1371/journal.pone.0235795]
- He Z, Hu J, Cai Z W, Wang W J and Hu Q. 2022. Remote sensing identification for *Artemisia argyi* integrating multi-temporal GF-1 and GF-6 images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(1): 186-195 (何真, 胡洁, 蔡志文, 王文静, 胡琼. 2022. 协同多时相国产 GF-1 和 GF-6 卫星影像的艾草遥感识别. *农业工程学报*, 38(1): 186-195) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.01.021]
- Hu C Y, Liu C M, Meng Q X, Zhao J, Ma J and Pang Q C. 2014. Identification of *Pilose antler* by spectral imaging technology. *Chinese Journal of Hospital Pharmacy*, 34(20): 1751-1753, 1784 (胡翠英, 刘传明, 孟庆霞, 赵静, 马骥, 庞其昌. 2014. 光谱成像法鉴别鹿茸真伪的研究. *中国医院药学杂志*, 34(20): 1751-1753, 1784) [DOI: 10.13286/j.cnki.chinhosp pharmacy.2014.20.13]
- Huang L X, Zhou Y B, Meng L W, Wu D and He Y. 2017. Comparison of different CCD detectors and chemometrics for predicting total anthocyanin content and antioxidant activity of mulberry fruit using visible and near infrared hyperspectral imaging technique. *Food Chemistry*, 224: 1-10 [DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.12.037]
- Kamenova I and Dimitrov P. 2021. Evaluation of Sentinel-2 vegetation indices for prediction of LAI, fAPAR and fCover of winter wheat in Bulgaria. *European Journal of Remote Sensing*, 54(S1): 89-108. [DOI: 10.1080/22797254.2020.1839359]
- Khderiy G and Yones M. 2021. Innovative spectral library for identification common wild plants using hyperspectral technology in Northwestern Coast, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3): 485-491 [DOI: 10.1016/j.ejrs.2020.08.002]
- Li W B, Wang K, Han G Q, Wang H, Tan N B and Yan Z Y. 2023a. Integrated diagnosis and time-series sensitivity evaluation of nutrient deficiencies in medicinal plant (*Ligusticum chuanxiong* Hort.) based on UAV multispectral sensors. *Frontiers in Plant Science*, 13: 1092610 [DOI: 10.3389/FPLS.2022.1092610]
- Li Y C, Zhang J, Zhang P, Xue Y F, Li Y and Chen C. 2022. Study on area of *Panax notoginseng* in Wenshan prefecture of Yunnan Province based on Sentinel-2. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 44(1): 89-97 (李宇宸, 张军, 张萍, 薛宇飞, 李雁, 陈晨. 2022. 基于 Sentinel-2 卫星遥感影像的云南省文山州三七种植面积估算研究. *云南大学学报(自然科学版)*, 44(1): 89-97) [DOI: 10.7540/j.ynu.20200432]
- Li Z G, Wang Y X, Xu M W, Liu H Y, Li L and Xu D L. 2023b. Molecular mechanism overview of metabolite biosynthesis in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 204: 108125 [DOI: 10.1016/J.PLAPHY.2023.108125]
- Li Z H, Li H, Zhang M J, Zhang L T, Li J and Liu J G. 2025. Physiological and molecular responses of tropical Seagrass *Enhalus acoroides* exposed to simultaneous high temperature and hypoxia stress. *Marine Environmental Research*, 205: 106997 [DOI: 10.1016/J.MARENRES.2025.106997]
- Liu L L, Wang Y Y, Yang J and Zhang X B. 2023. Rapid detection technology of chemical component content in Lycii Fructus based on hyperspectral technology. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 48(16): 4328-4336 (刘玲玲, 王游游, 杨健, 张小波. 2023. 基于高光谱技术的枸杞子化学成分含量快速检测技术研究. *中国中药杂志*, 48(16): 4328-4336) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20230512.101]
- Liu M X, Liu J H, Atzberger C, Jiang Y, Ma M F and Wang X M. 2021. *Zanthoxylum bungeanum Maxim* mapping with multi-temporal Sentinel-2 images: The importance of different features and consistency of results. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 174: 68-86 [DOI: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2021.02.003]
- Liu Y, Feng H K, Fan Y G, Yue J B, Yang F Q, Fan J J, Ma Y P, Chen R Q, Bian M B and Yang G J. 2025. Utilizing UAV-based hyperspectral remote sensing combined with various agronomic traits to monitor potato growth and estimate yield. *Computers and Electronics in Agriculture*, 231: 109984 [DOI: 10.1016/J.COMPAG.2025.109984]
- Liu Y H, Wang Q Q, Gao X W and Xie A G. 2019. Total phenolic content prediction in *Flos Lonicerae* using hyperspectral imaging combined with wavelengths selection methods. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6): e13224 [DOI: 10.1111/jfpe.13224]
- Lowe A, Harrison N and French A P. 2017. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods*, 13(1): 80 [DOI: 10.1186/s13007-017-0233-z]
- Luo L, Liu W, Liang D, Li R, Ma Y J and Lyu X L. 2025. Effects of field high temperature on antioxidant and photosynthetic characteristic of grapes in different trellis systems. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 39(2): 414-426 (罗玲, 刘伟, 梁东, 李然, 马一君, 吕秀兰. 2025. 田间高温对不同架式葡萄抗氧化及光合特性的影响. *核农学报*, 39(2): 414-426) [DOI: 10.11869/j.issn.1000-8551.2025.02.0414]
- Mahajan G R, Sahoo R N, Pandey R N, Gupta V K and Kumar D. 2014. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agriculture*, 15(5): 499-522 [DOI: 10.1007/s11119-014-9348-7]
- Meng F, Cui Y and Fu P J. 2021. Spectral STFT analysis and leaf copper ion concentration inversion of maize leaves under copper stress. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 52(4): 181-189 (孟飞, 崔宇, 付萍杰. 2021. 铜胁迫下玉米叶片光谱 STFT 分析与叶片铜离子浓度反演. *农业机械学报*, 52(4): 181-189) [DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.019]
- Njane S N, Tsuda S, van Marrewijk B M, Polder G, Katayama K and Tsuji H. 2023. Effect of varying UAV height on the precise estimation of potato crop growth. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1233349 [DOI: 10.3389/FPLS.2023.1233349]
- Ortiz D, Hu J Y and Salas Fernandez M G. 2017. Genetic architecture of photosynthesis in *Sorghum bicolor* under non-stress and cold stress conditions. *Journal of Experimental Botany*, 68(16): 4545-4557 [DOI: 10.1093/jxb/erx276]
- Qiao L, Zhang Y Q, Zhao B Y, Zhou C Y, Liu R N, Han P P, Zhang R

- and Dong C M. 2022. Rapid identification of *Banxia* (Pinelliae Rhizoma) from different areas by infrared spectroscopy. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 40(11): 73-76 (乔璐, 张雨晴, 赵博宇, 周春亚, 刘瑞娜, 韩盼盼, 张瑞, 董诚明. 2022. 基于红外光谱技术对不同产地半夏的快速鉴别. 中华中医药学刊, 40(11): 73-76) [DOI: 10.13193/j.issn.1673-7717.2022.11.018]
- Sandasi M, Vermaak I, Chen W Y and Viljoen A M. 2014. Hyperspectral imaging and chemometric modeling of Echinacea — a novel approach in the quality control of herbal medicines. Molecules, 19(9): 13104-13121 [DOI: 10.3390/molecules190913104]
- Shi T T, Zhang X B, Guo L P and Huang L Q. 2019. Random forest classification of *Callicarpa nudiflora* from WorldView-3 imagery based on optimized feature space. China Journal of Chinese Materia Medica, 44(19): 4073-4077 (史婷婷, 张小波, 郭兰萍, 黄璐琦. 2019. 基于WorldView-3影像特征空间优化的随机森林算法在裸花紫珠信息提取中的研究. 中国中药杂志, 44(19): 4073-4077) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20190731.104]
- Shi T T, Zhang X B, Guo L P, Jing Z X and Huang L Q. 2020. Research on remote sensing recognition of wild planted *Lonicera japonica* based on deep convolutional neural network. China Journal of Chinese Materia Medica, 45(23): 5658-5662 (史婷婷, 张小波, 郭兰萍, 景志贤, 黄璐琦. 2020. 基于深度卷积神经网络的仿野生种植金银花遥感识别方法研究. 中国中药杂志, 45(23): 5658-5662) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20200927.103]
- Singh N, Kaur S, Jain A, Kumar A, Bhardwaj R, Pandey R and Riari A. 2024. Comparative analysis of deep learning and machine learning-based models for simultaneous prediction of minerals in *perilla* (*Perilla frutescens* L.) seeds using near-infrared reflectance spectroscopy. Journal of Food Composition and Analysis, 136: 106824 [DOI: 10.1016/J.JFCA.2024.106824]
- Sun C Z. 2012. Application research status and technical discussion of ‘3S’ technology in the field of traditional Chinese medicine resources//Chinese Medicine and Natural Medicine Summit Forum and the 12th National Symposium on Chinese Medicine and Natural Medicine. Haikou: Chinese Pharmaceutical Association Traditional Chinese Medicine and Natural Medicine Professional Committee (孙成忠. 2012. “3S”技术在中药资源领域的应用研究现状与技术探讨//中药与天然药高峰论坛暨第十二届全国中药和天然药物学术研讨会论文集. 海口: 中国药学会中药和天然药专业委员会)
- Tang F, Li Y Y, Yang N K, Zhou Q, Liu H Y and Zou T C. 2025. Population spatial patterns and association of rare and endangered plant *Camellia kweichowensis*. Guihaia, 45(1): 185-196 (唐凤, 李媛媛, 杨乃坤, 周泉, 刘海燕, 邹天才. 2025. 稀有濒危植物贵州红山茶的种群空间格局及关联性研究. 广西植物, 45(1): 185-196) [DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202402021]
- Tankeu S, Vermaak I, Chen W Y, Sandasi M and Viljoen A. 2016. Differentiation between two “fang ji” herbal medicines, *Stephania tetrandra* and the nephrotoxic *Aristolochia fangchi*, using hyperspectral imaging. Phytochemistry, 122: 213-222 [DOI: 10.1016/j.phytochem.2015.11.008]
- Tshabalala T, Abdel-Rahman E M, Ncube B, Ndhlala A R and Mutanga O. 2021. Leveraging of hyperspectral remote sensing on estimating biomass yield of *Moringa oleifera* Lam. medicinal plant. South African Journal of Botany, 140: 37-49 [DOI: 10.1016/j.sajb.2021.03.035]
- Vermaak I, Viljoen A and Lindström S W. 2013. Hyperspectral imaging in the quality control of herbal medicines - The case of neurotoxic Japanese star anise. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 75: 207-213 [DOI: 10.1016/j.jpba.2012.11.039]
- Wakeel A, Ali I, Upreti S, Azizullah A, Liu B H, Khan A R, Huang L L, Wu M J and Gan Y B. 2018. Ethylene mediates dichromate-induced inhibition of primary root growth by altering *AUX1* expression and auxin accumulation in *Arabidopsis thaliana*. Plant, Cell and Environment, 41(6): 1453-1467. [DOI: 10.1111/pce.13174]
- Wang L, Qin H, Li J, Zhang X B, Yu L N, Li W J and Huang L Q. 2020. Geographical origin identification of lycium barbarum using near-infrared hyperspectral imaging. Spectroscopy and Spectral Analysis, 40(4): 1270-1275 (王磊, 覃鸿, 李静, 张小波, 于丽娜, 李卫军, 黄璐琦. 2020. 近红外高光谱图像的宁夏枸杞产地鉴别. 光谱学与光谱分析, 40(4): 1270-1275) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)04-1270-06]
- Wang W K, Zhang J Y, Wang H, Cao Q, Tian Y C, Zhu Y, Cao W X and Liu X J. 2023. Non-destructive monitoring of rice growth key indicators based on fixed-wing UAV multispectral images. Scientia Agricultura Sinica, 56(21): 4175-4191 (王伟康, 张嘉懿, 汪慧, 曹强, 田永超, 朱艳, 曹卫星, 刘小军. 2023. 基于固定翼无人机多光谱影像的水稻长势关键指标无损监测. 中国农业科学, 56(21): 4175-4191) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2023.21.004]
- Watson D J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. Annals of Botany, 11(1): 41-76 [DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a083148]
- Wen A M, Zheng J H, Mu C, Yang H F, Shayilawu and Wang W. 2015. Remote sensing monitoring and analysis of poisonous plants - aconitum leucostomum worosch based on GF-1 WFV data. Xinjiang Agricultural Sciences, 52(10): 1939-1946 (温阿敏, 郑江华, 穆晨, 杨会枫, 沙依拉吾, 王卫. 2015. 基于GF-1 WFV数据的草原毒草白喉乌头空间分布监测与分析. 新疆农业科学, 52(10): 1939-1946) [DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2015.010.025]
- Wu F Z, Zheng M H, Hu W Y, Hu G X, Wang L, Dong X X and Lu Y P. 2021. Remote sensing extraction and change analysis of *Panax notoginseng* planting area in Wenshan prefecture of Yunnan province in past decade based on TM and OLI data. Acta Agriculturae Jiangxi, 33(6): 90-97 (吴凤志, 郑买红, 胡文英, 胡国贤, 王郦, 董兴欣, 卢艳萍. 2021. 基于TM和OLI数据的近10年云南文山三七种植区遥感提取与变化分析. 江西农业学报, 33(6): 90-97) [DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2021.06.016]
- Wu Q X, Tan J H, Zhu J Q, Liu K W and Li J B. 2020. Hyperspectral and photosynthetic characteristics of waterlogged cotton during flowering and boll-forming stages and their relationship model. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 36(6): 142-150 (吴启侠, 谭京红, 朱建强, 刘凯文, 李晋波. 2020. 花铃期受涝棉花的高光谱—光合特征及关系模型. 农业工程学

- 报, 36(6): 142-150 [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.017]
- Wu Y D, Geng W, Song Y L, Chen G, Pan L and Liu H T. 2014. Determination of heavy metal content in 17 kinds of commonly used Chinese herbal pieces. *Xinjiang Journal of Traditional Chinese Medicine*, 32(4): 57-59 (吴亚东, 耿伟, 宋玉龙, 陈刚, 潘兰, 刘海涛. 2014. 17种常用中药饮片重金属含量测定. *新疆中医药*, 32(4): 57-59)
- Xia Z Y, Zhang C, Weng H Y, Nie P C and He Y. 2017. Sensitive wavelengths selection in identification of *Ophiopogon japonicus* based on near-infrared hyperspectral imaging technology. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017: 6018769 [DOI: 10.1155/2017/6018769]
- Xiao B. 2023. Research on the Fine Classification and Chlorophyll Content Estimation of Citrus Fruit Trees Based on Hyperspectral Data. Guilin: Guilin University of Technology (肖斌. 2023. 基于高光谱的柑橘果树精细分类与叶绿素含量估测方法. 桂林: 桂林理工大学) [DOI: 10.27050/d.cnki.gglgc.2023.000531]
- Xiao L J, Yang W D, Feng M C, Sun H and Wang C. 2020. Effects of drought stress on canopy spectra and red edge parameters of winter wheat. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 40(5): 92-98 (肖璐洁, 杨武德, 冯美臣, 孙慧, 王超. 2020. 干旱胁迫对冬小麦冠层光谱及红边参数的影响. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 40(5): 92-98) [DOI: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202004034]
- Xie C X, Chen S L, Lin Z J, Zhou Y Q and Li Y. 2007. The application of UAV remote sensing technology in medicinal plant resources investigation and research. *Modern Chinese Medicine*, 9(6): 4-6 (谢彩香, 陈士林, 林宗坚, 周应群, 李滢. 2007. 无人机遥感技术应用于药用植物资源调查研究. *中国现代中药*, 9(6): 4-6) [DOI: 10.13313/j.issn.1673-4890.2007.06.002]
- Xu M M, Dai J G, Zhang G S, Hou W Q, Mu Z Y, Chen P P, Cao Y J and Zhao Q Z. 2024. Inversion of glycyrrhiza chlorophyll content based on hyperspectral imagery. *Agronomy*, 14(6): 1163 [DOI: 10.3390/AGRONOMY14061163]
- Yang C B, Bai J, Sun H, Bi R T, Song L F, Muhammad A, Wang C, Zhao Y, Yang W D, Xiao L J, Zhang M J, Song X Y and Feng M C. 2025. A new feature selection algorithm combining genetic algorithm, exponential decay function, and machine learning to realize hyperspectral estimation of winter wheat leaf area index. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230: 109851 [DOI: 10.1016/J.COMPAG.2024.109851]
- Yang M, Chen L L, Zhang X B, Zhao Y J, Shi T T, Cheng M E and Peng H S. 2019. Extracting *Paeonia lactiflora* planted area in Dangshan of Anhui province based on ZY-3 remote sensing image. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 44(19): 4101-4106 (杨莓, 陈灵丽, 张小波, 赵玉姣, 史婷婷, 程铭恩, 彭华胜. 2019. 基于ZY-3号卫星数据的白芍种植信息遥感提取. *中国中药杂志*, 44(19): 4101-4106) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20190731.106]
- Yang X J. 2020. Research on Hyperspectral Remote Sensing Monitoring Model of Rice Growth Parameters Under Gradient Warming Condition. Shenyang: Shenyang Agricultural University (杨晓瑾. 2020. 梯度增温条件下水稻生长参数的高光谱遥感监测模型研究. 沈阳: 沈阳农业大学) [DOI: 10.27327/d.cnki.gshnu.2020.000266]
- Yin M Z, Xie H Q, Cheng M E, Zhao Y J, Shi T T, Zhang X B and Peng H S. 2019. Planting area estimation of *Paeonia ostii* based on RS—by case study in Dangshan of Anhui province. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 44(19): 4107-4110 (尹旻臻, 解会群, 程铭恩, 赵玉姣, 史婷婷, 张小波, 彭华胜. 2019. 基于遥感影像的凤丹种植面积提取方法研究. *中国中药杂志*, 44(19): 4107-4110) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20190731.108]
- Yu D X, Guo S, Zhang X, Yan H, Zhang Z Y, Li H Y, Yang J and Duan J A. 2022. Rapid identification of geographic origins of Zingiberis Rhizoma by NIRS combined with chemometrics and machine learning algorithms. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 47(17): 4583-4592 (余代鑫, 郭盛, 张霞, 严辉, 张振宇, 李海洋, 杨健, 段金殿. 2022. 近红外光谱技术结合化学计量学和机器学习算法的干姜产地溯源研究. *中国中药杂志*, 47(17): 4583-4592) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20220514.103]
- Zhang B G, Chen S L, Zhang J S, Su G Q, Zhou Y Q, Yang Z and Xiao S Y. 2005. Resources survey of *Glycyrrhiza uralensis* based on remote sensing technique. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 36(10): 1548-1551 (张本刚, 陈士林, 张金胜, 苏钢强, 周应群, 杨智, 肖诗鹰. 2005. 基于遥感技术的甘草资源调查方法研究. *中草药*, 36(10): 1548-1551) [DOI: 10.3321/j.issn.0253-2670.2005.10.043]
- Zhang D M, Luo Y M and Peng W F. 2019. Study on the suitability distribution of rhizoma zingiberis recens resources in Sichuan Province based on remote sensing and GIS. *Modernization of Traditional Chinese Medicine-World Science and Technology*, 21(10): 2213-2224 (张冬梅, 罗艳玫, 彭文甫. 2019. 基于遥感和GIS的四川省姜资源适宜性分布范围研究. *世界科学技术—中医药现代化*, 21(10): 2213-2224) [DOI: 10.11842/wst.20181018004]
- Zhang F, Jing Z X, Ji B Y, Pei L X, Chen S Q, Wang X Y, Zhang X B, Shi T T and Huang L Q. 2019. Study of extracting natural resources of Chinese medicinal materials planted area in Luoning of Henan province based on UAV of low altitude remote sensing technology and remote sensing image of satellite. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 44(19): 4095-4100 (张飞, 景志贤, 纪宝玉, 裴莉昕, 陈随清, 王炫瓊, 张小波, 史婷婷, 黄璐琦. 2019. 基于无人机低空遥感与卫星遥感的洛宁县中药资源种植面积估算研究. *中国中药杂志*, 44(19): 4095-4100) [DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20190731.102]
- Zhang Y X, Jin L, Feng S S, Liu J G and Chai T Y. 2013. Effects of Cd on activity and gene expression of antioxidant enzymes in hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 30(1): 11-17 (张玉秀, 金玲, 冯珊珊, 刘金光, 柴团耀. 2013. 镉对镉超累积植物龙葵抗氧化酶活性及基因表达的影响. *中国科学院研究生院学报*, 30(1): 11-17)
- Zhao J, Pang Q C, Ma J, Liu C M, Wang L and Meng Q X. 2010. Rapid identification of cortex dictamni pieces and its counterfeit alangium Chinense by spectral imaging method. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 35(13): 1696-1698 (赵静, 庞其昌, 马骥, 刘传明, 王琳, 孟庆霞. 2010. 光谱成像技术快速鉴别白鲜皮及其

- 伪品八角枫. 中国中药杂志, 35(13): 1696-1698 [DOI: 10.4268/cjcm20101309]
- Zhao J, Pang Q C, Ma J, Zheng X W, Meng Q X and Liu C M. 2008. Main active constituent detection of cortex phellodendri chinensis by spectral imaging technology. *Acta Optica Sinica*, 28(12): 2288-2291 (赵静, 庞其昌, 马骥, 郑茜文, 孟庆霞, 刘传明. 2008. 中药黄柏主要活性成分的光谱成像检测技术. *光学学报*, 28(12): 2288-2291) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-2239.2008.12.009]
- Zhao R X, Zhang B Y, Zhang C M, Chen Z Y, Chang N, Zhou B Y, Ke K and Tang F. 2024. Goji disease and pest monitoring model based on unmanned aerial vehicle hyperspectral images. *Sensors*, 24(20): 6739 [DOI: 10.3390/S24206739]
- Zhao S, Fu Y, Cui J N, Lu Y, Du X D and Li Y L. 2021. Application of hyperspectral imaging in the diagnosis of *Acanthopanax senticosus* black spot disease. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(6): 1898-1904 (赵森, 付芸, 崔江南, 鲁烨, 杜旭东, 李永亮. 2021. 高光谱的刺五加黑斑病的早期检测研究. *光谱学与光谱分析*, 41(6): 1898-1904) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)06-1898-07]
- Zheng B J, Chen Y Z, Li K, Wang X Q, Xu Z H, Huang X Y and Hu X Y. 2021. Detection of pest degree of phyllostachys Chinese with hyperspectral data. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(10): 3200-3207 (郑蓓君, 陈芸芝, 李凯, 汪小钦, 许章华, 黄旭影, 胡新宇. 2021. 高光谱数据的刚竹毒蛾虫害程度检测. *光谱学与光谱分析*, 41(10): 3200-3207) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3200-08]
- Zhou Y Q, Chen S L, Zhang B G, Zhang J S, Zhang J, Chen Z J, Cui X M. 2005. Studies on the resources survey methods of *Panax notoginseng* based on remote sensing. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 30(24): 1902-1905 (周应群, 陈士林, 张本刚, 张金胜, 张俊, 陈中坚, 崔秀明. 2005. 基于遥感技术的三七资源调查方法研究. *中国中药杂志*, 30(24): 1902-1905) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-5302.2005.24.005]
- Zhu Z, Yuan X P, Gan S, Zhang L J and Zhao Q H. 2020. GF-1 remote sensing data for *Panax notoginseng* planting information extraction in Wenshan, Yunnan Province. *Journal of Zhejiang A and F University*, 37(1): 129-135 (朱赞, 袁希平, 甘淑, 张良洁, 赵庆会. 2020. 高分1号数据用于云南文山三七种植信息提取. *浙江农林大学学报*, 37(1): 129-135) [DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2020.01.017]
- Zhuo F X, Shi T T, Zhang X B, Meng J H and Zhang L. 2023. Remote sensing method for planted licorice identification based on phenological difference index. *China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 38(12): 5729-5732 (翟富祥, 史婷婷, 张小波, 蒙继华, 张磊. 2023. 基于物候差异指数的栽培甘草遥感识别方法. *中华中医药杂志*, 38(12): 5729-5732)
- Zou Z Y, Wu X W, Chen Y M, Bie Y B, Wang L and Lin P. 2019. Investigation of hyperspectral imaging technology for detecting frozen and mechanical damaged potatoes. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(11): 3571-3578 (邹志勇, 吴向伟, 陈永明, 别云波, 王粒, 林萍. 2019. 低温冷冻和机械损伤条件下马铃薯高光谱图像特征响应特性研究. *光谱学与光谱分析*, 39(11): 3571-3578) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)11-3571-08]

Research progress on remote sensing monitoring of medicinal plant resources

FAN Yuxin¹, WANG Ziyang¹, YANG Yingpin², HOU Lu², WU Zhifeng²,
WANG Jinnian², WANG Xumei¹

1. School of Pharmacy, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;

2. School of Geography and Remote Sensing/Institute of Aerospace Remote Sensing Innovations, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Medicinal plants are the material basis for the inheritance and development of traditional Chinese medicine. They contain a variety of bioactive components and have a wide range of pharmacological effects. The quality of medicinal materials varies greatly under different geographical and climatic conditions. At present, medicinal plants have shortcomings in delicacy management, sustainable utilization of resources, dynamic monitoring of pests and diseases, and growth warning. Traditional research methods are time consuming, laborious, and destructive sampling. As a nondestructive monitoring method, remote sensing technology is capable of rapidly and systematically acquiring large-scale, quantitative, and periodic information, which has been widely used in the production process of Chinese medicinal materials. On the basis of the development process of remote sensing technology and the current research status of medicinal plant resources, this study systematically reviews the application progress of remote sensing technology in four aspects, namely, resource inventory and investigation, quality assessment and analysis, growth status monitoring, and stress detection and monitoring of medicinal plants. By meticulously examining these application domains, this review elucidates the distinctive advantages and transformative potential of remote sensing technology in overcoming the inherent limitations of conventional monitoring approaches. Currently, remote sensing technology has evolved into a comprehensive perception system characterized by the complementary integration of satellite-based, unmanned aerial vehicle, and ground-based remote sensing data. Meanwhile, this technological framework continues to expand its monitoring dimensions, enhance its detection depth, and diversify its application scenarios. Consequently, remote sensing demonstrates

substantial potential and broad prospects in the domain of medicinal plant research, offering unprecedented opportunities for large-scale, multitemporal, and high-precision investigation of medicinal plant resources, their spatial distribution patterns, growth dynamics, and ecological environments. This review systematically summarizes and critically evaluates the existing limitations and deficiencies inherent in current research endeavors. Building upon this comprehensive analysis, we propose several strategic directions for future advancement, including the establishment of a collaborative sensing system based on multisource active remote sensing, the in-depth exploration of underlying biophysical and biochemical mechanisms, the implementation of full-cycle and cross-scale monitoring, and the promotion of interdisciplinary integration. These proposed orientations aim to provide innovative theoretical frameworks and practical approaches for leveraging modern scientific and technological advancements to drive the sustainable development of the traditional Chinese medicinal material industry, thereby contributing to the preservation, rational utilization, and industrial upgrading of valuable medicinal plant resources. In summary, this study systematically reviews the research progress of remote sensing technology in the field of medicinal plant resources from the perspectives of resource investigation, quality analysis, growth status, and stress monitoring and comprehensively summarizes the relevant achievements and existing challenges. It aims to provide a reference for related research worldwide and promote the further in-depth application of remote sensing technology in medicinal plant resource studies.

Key words: medicinal plants, remote sensing technology, monitoring, resource survey, quality analysis, environmental stress

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42201413); Traditional Chinese Medicine Science and Technology Innovation Team Project of Shaanxi Provincial Administration of Traditional Chinese Medicine (No. TZKN-CXTD-09); Guangdong Provincial Science and Technology Plan Project (Basic Platform) (No. 2024B1212080004); Basic and Applied Basic Research Project of Guangzhou Science and Technology Bureau in 2025 (Young Doctor's Start Project) (No. SL2024A04J01468)